Einfluss der Häcksellänge auf Verdichtbarkeit, Silierung und Nacherwärmung von Silomais

Andrea Wagner, Kristina Leurs und **Wolfgang Büscher**
Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Institut für Landtechnik, Bonn

Qualitätseinbußen durch Nacherwärmung führen bei der Konservierung von Mais nach wie vor zu erheblichen Problemen in der praktischen Milchviehfütterung. Es muss davon ausgegangen werden, dass diese Probleme in Zukunft noch zunehmen. Das Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, die quantitativen Zusammenhänge zwischen Maissorte, Häcksellänge und Aufbereitungsgrad zu ermitteln. Im Folgenden werden Versuchsaufbau, Methoden und erste Ergebnisse der umfangreichen Untersuchungen zum Schwerpunkt Flachsilo, die im Rahmen einer Dissertation durchgeführt wurden, dargelegt. Diese Arbeiten werden fortgesetzt.

Schlüsselwörter
Silomais, Häcksellänge, Verdichtbarkeit, Silierung, Nacherwärmung

Einleitung

Untersuchungen der letzten Jahre zeigen, dass verschiedene Argumente für eine Erhöhung des Grundfutteranteils in der Milchviehfütterung sprechen. Im Hinblick auf Maissilagen hat eine Erhöhung des Anteils in der Ration folgende Vorteile:

- Gewährleistung einer wiederkäuergerechten Ration durch Erhöhung der Wiederkauaktivität [1];
- Verbesserung der energetischen Stärkenutzung durch geringere ruminale Abbaubarkeit von Maisstärke im Vergleich zu Stärke aus anderen Getreidearten [1];
- Verbesserung der Wirtschaftlichkeit durch Reduktion des Kraftfutterzukaufes [2];
- Verbesserung der Umweltverträglichkeit im Sinne des Kreislaufgedankens durch Reduzierung der Nährstoffimporte in den Betrieb durch Kraftfutterzukauf [3].

Voraussetzung für einen hohen Maisanteil in der Ration ist eine hohe Qualität dieses Grundfutters. Allerdings führen Qualitätseinbußen durch Nacherwärmung bei der Konservierung von Mais nach wie vor zu erheblichen Problemen in der praktischen Fütterung. Die Folgen von Nacherwärmung, verursacht durch Stoffwechselaktivitäten unerwünschter Mikroorganismen im Futterstock, sind neben Verlusten der Schmackhaftigkeit und dem Befall durch Mykotoxine insbesondere Energieverluste. Eine Nacherwärmung von 10°C führt beispielsweise zu täglichen Energieverlusten des Futters in Höhe von 0,1 MJNEL pro kg TM [4].

Aufgrund folgender Entwicklungen ist in Zukunft mit einer noch höheren Relevanz des Nacherwärmungsproblems zu rechnen:

- Durch die steigende Tendenz zur ganzjährigen Stallhaltung und der damit verbundenen ganzjährigen Silagefütterung steigen die Anforderungen an die Langzeitstabilität von Silagen weiter.
- Bedingt durch die steigende Schlagkraft von Feldhäckslern wird die Verdichtungsarbeit, ein wichtiger Faktor zur Vermeidung von Nacherwärmung, zur Schwachstelle in der Silierkette.
- Eine Steigerung der Häcksellänge zur Verbesserung der Strukturwirksamkeit ist momentan Gegenstand der Diskussion, was eine ausreichende Verdichtung zusätzlich erschwert.
- Die zunehmende Verbreitung von Sorten mit „Greening-Effekt“ (verlangsamte Restpflanzenabreife) führt zu der Frage nach den Siliereigenschaften dieser Sorten.

Zielsetzung

Ziel dieses Projektes ist die Ermittlung quantitativer Zusammenhänge zwischen Maissorte, Häcksellänge und Aufbereitungsgrad auf die Siliereigenschaften von Mais. Folgende Fragen sollen daher geklärt werden:

- Wie kann die Verdichtung mit vertretbarem Aufwand optimiert werden?
- Ist eine ausreichende Verdichtung mit Häcksellängen ≥20 mm überhaupt möglich, welcher zusätzliche Verdichtungsaufwand ist dazu erforderlich?
- Wie exakt lassen sich Sorten mit einem „Greening-Effekt“ im Vergleich zu etablierten Sorten zerkleinern und verdichten?

Allgemeiner Forschungsstand

Im Bezug auf die genannten Fragestellungen sind bereits eine Reihe von Versuchen zur Grundfutterqualität durchgeführt worden. In vielen dieser Versuche wurde jedoch lediglich eine Teilbetrachtung vorgenommen.

Aus ernährungsphysiologischer Sicht ist momentan insbesondere die Strukturwirksamkeit von Interesse [5]. Eine Steigerung der Strukturwirksamkeit von Maissilage ermöglicht aus pansenphysiologischen Gründen eine Erhöhung dieses energiereichen und zumeist wirtschaftseigenen Grundfutters in den Futterrationen. Entscheidender Parameter für die Strukturwirksamkeit ist die Häcksellänge.

Allerdings dürfen bei der Bewertung der Futterqualität, die bekanntlich Resultat einer vielfach vernetzten Prozesskette ist, keine isolierten Teilbetrachtungen maßgeblich sein.

Im Rahmen der Untersuchungen zum Struktureinfluss finden entscheidende Einflussgrößen wie Maissorte und Qualität des Silierprozesses in der Regel keine Beachtung.

Umgekehrt umfassen die Untersuchungen zur Auswirkung der Häcksellänge auf Siliereigenschaften nur sporadisch Informationen über den Einfluss der Sorte und Konsequenzen für die Tierphysiologie.

Folglich bedarf es einer systematischen Untersuchung des gesamten Prozesses unter Berücksichtigung der beeinflussenden Faktoren.

Pflanzenmaterial

Auswirkung des Abreifeverhaltens einer Maissorte auf die Siliereignung

Bezüglich des Abreifeverhaltens und der Siliereignung finden sich in der Literatur widersprüchliche Aussagen. Während nach Mitteilungen der Landwirtschaftskammer Weser-Ems [6] Maisbestände mit zügiger Abreife von Blättern, Spindeln und Stängeln hinsichtlich Verdichtbarkeit und der Silierung als problematisch einzustufen sind, konnten Untersuchungen der Landwirtschaftskammer Rheinland [7] diese Hypothese nicht bestätigen. Ein Sortenvergleich zwischen Pflanzen mit verschiedenem Abreifeverhalten zeigte keine Differenz bezüglich der Siliereignung. Allerdings bestanden bei allen geprüften Sorten Probleme bezüglich der Nacherwärmung.

Auswirkung des Abreifeverhaltens einer Maissorte auf die Tierphysiologie

Höner u. a. [8] führten einen Versuch durch, in dem sie die Verdaulichkeit von Maissilagen aus vier verschiedenen Sorten am fistulierten Tier sowohl mit der Nylonbag Methode, als auch mit Hilfe von Pansen- und Duodenum-Kanülen ermittelten. Zwischen den Verdaulichkeiten der verschiedenen Fraktionen zeigten sich signifikante Unterschiede. Wie diese Untersuchung zeigt, ist die Wahl der Maissorte eine entscheidende Voraussetzung für ein Grundfutter mit hoher Verdaulichkeit.

Böhm u. a. [9] beschreiben beim Rind eine Verminderung der Verdaulichkeit der organischen Substanz mit fortschreitender Entwicklung des Silomaises. Durch Züchtung neuer „Stay-green"-Sorten, mit dem Ziel einer weitgehenden genetischen Entkopplung von generativer und vegetativer Abreife, wurde versucht, dieses Problem zu lösen [10]. Hartmann u. a. [11] stellten einen erhöhten Energiewert der „Stay-green"-Sorten im Vergleich zu Sorten, mit schneller Restpflanzenabreife fest. Dieser war in erster Linie durch hohe Gehalte an wasserlöslichen Kohlenhydraten und eine höhere Restpflanzenverdaulichkeit bedingt. Hepting [12] konnte weder eine erhöhte Verdaulichkeit bei den „Stay-green"-Sorten, noch einen erhöhten Futterwert feststellen.

Diese Ergebnisse lassen weder eine eindeutige Aussage bezüglich der Verdaulichkeit von „Stay-green"-Sorten, noch zu deren Futterwert zu.

Um Empfehlungen über eine geeignete Maissorte für die leistungsgerechte Versorgung von Wiederkäuern formulieren zu können bedarf es einer Untersuchung von „Stay-green"-Sorten im Vergleich zu Sorten mit zügiger Restpflanzenabreife.

Erntetechnik und Silierprozess

Entscheidend für die Gewinnung einer hochwertigen Maissilage ist ein reibungsloser Ablauf des Silierprozesses. Nur so kann mit den geringsten Verlusten ein Grundfutter erstellt werden, das aufgrund seiner hohen Energie- und Nährstoffkonzentration, sowie einem ausreichenden Maß an Struktur, überdurchschnittlich hohe Grundfutteranteile in der Milchviehration erlaubt.

Auswirkung von Erntetechnik und Silierprozess auf Siliererfolg und Futterqualität

Qualitätseinbußen durch Nacherwärmung führen bei der Konservierung von Mais nach wie vor zu erheblichen Problemen. Bedeutender Parameter zur Vermeidung von Nacherwärmung ist die Verdichtung des Materials bei der Silierung. Der Verdichtungserfolg ist in hohem Maße abhängig von der Partikelgröße und vom Verdichtungsaufwand (Druck, Dauer, Anzahl der Belastungen).

Schwarz u. a. [13] stellten fest, dass es aufgrund der Entwicklung von neuen Maissorten mit schnell abreifendem Korn und langsam abreifender Restpflanze neue Anforderungen an die Zerkleinerungstechnik gibt. Des Weiteren weisen sie auf die Notwendigkeit hin, die Frage der Zerkleinerungstechnik von Silomais hinsichtlich neuer technischer Möglichkeiten gegenüber den achtziger Jahren erneut zu prüfen. Aufgrund dieser Entwicklungen besteht erheblicher Untersuchungsbedarf in Bezug auf den optimalen Einsatz der zur Verfügung stehenden Technik und den Umgang mit den neuen Sorten.

Zur Beurteilung der Erntetechnik bedarf es zunächst eines Vergleichs zwischen angestrebter, also theoretischer Häckselläng e und erreichter Häckselängenverteilung.

Wichtiges Bewertungskriterium ist dabei der Anteil der von der angestrebten Häckselläng e abweichenden Partikellängen, insbesondere Überlängenfraktionen.

Schwarz und Kirchgessner [14] ermittelten in ihrer Untersuchung einen Überlängenanteil von mindestens 20 % bei theoretischen Häckselläng en von 4 bzw. 7 mm.

Versuche der Landwirtschaftskammer Rheinland in Zusammenarbeit mit der Universität Bonn, bei denen Maisproben von 61 Betrieben hinsichtlich der Partikellänge klassifiziert wurden, ergaben für die Fraktion > 15 mm Anteile von bis zu 10 % [15].

Auch in weiteren Untersuchungen wurde die Relevanz der Gutcharakterisierung immer wieder betont [16, 17].

Nach Honig und Rohr [18] führt eine starke Zerkleinerung von Siliergut zu einem schnellen Einsatz der bakteriellen Säuerung und somit zu einem schnellen Beenden der Restatmung. Die aus der geringen Partikellänge resultierende hohe Lagerungsdichte verringert die Vermehrung von Gärschädlingen und unterbindet einen unerwünschten Temperaturanstieg im Silo. Ähnliche Ergebnisse erzielten Johnson u. a. [19].

Auswirkung von Erntetechnik und Silierprozess auf die Tierphysiologie

In den letzten Jahren waren größere Häckselläng en zur Verbesserung der Strukturwirksamkeit vermehrt Gegenstand der Diskussion gewesen. De Brabander u. a. [5] bestätigten mit ihren Versuchen den Zusammenhang zwischen Futterstruktur, Kauaktivität und Speichelfluss und somit Pufferkapazität und Fettsäuremuster im Pansen. Als Messgröße der Strukturwirksamkeit der geprüften Futtermittel diente die Kauaktivität. Der Vergleich von Maissilagen mit verschiedenen Häckselläng en ergab eine Erhöhung der Kauaktivität mit steigender Partikellänge.

Neben der Häckselläng e sind technische Aufbereitungsverfahren und Trockenmassegehalt von Bedeutung [20].

Material und Methoden

Versuchsaufbau

Im Jahr 2003 wurden auf den Flächen der Lehr- und Versuchsanstalt „Haus Riswick" in Zusammenarbeit mit der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen zwei unterschiedliche Maissorten angebaut. Diese wurden in drei verschiedenen Häckselläng en (HL 5,5; 14,0 und 21,0 mm) und zwei Spaltweiten des Corn Crackers (SW 1,0 und 2,0 mm) gehäckselt und in Flach- und Schlauchsilos einsiliert (**Bild 1**).

Die Varianten wurden hinsichtlich Häcksel- und Aufbereiterqualität, Verdichtbarkeit und Temperaturverlauf im Silo untersucht. Analysen der Inhaltsstoffe und die Untersuchung von aerober Stabilität und Gärqualität in Siliergläsern dienen der Beschreibung weiterer Qualitätsparameter des Ausgangsmaterials.

Zur Ernte der Silomais-Bestände wurde ein selbstfahrender Feldhäcksler mit einer

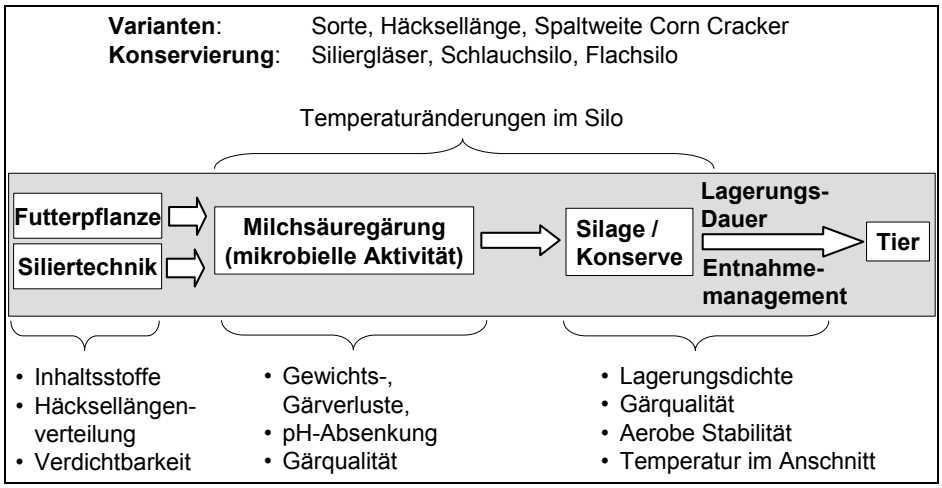


Bild 1: Untersuchungsparameter innerhalb der Erntekette von Silomais

24-Messer-Trommel (konstante Drehzahl) eingesetzt. Die Einstellung der Schnittlänge erfolgte über die Geschwindigkeit der Einzugswalzen.

Für die Untersuchung wurden sechs Schlauchsilos (zwei Sorten, drei Häckssellängen) mit einheitlicher Verdichtung im Schlauch für alle Varianten, angelegt. Schlauchsilos haben den Vorteil, dass sie für Versuchszwecke kleine Versuchseinheiten (2,40 m Durchmesser, ca. 10 m Länge) darstellen und gleichzeitig die Möglichkeit des *praxisnahen* direkten Vergleichs der Silagequalität und Langzeitstabilität bieten. Hier ist eine standardisierte Verdichtung für Vergleichszwecke möglich.

Um den Vergleich zum Flachsilo durchführen zu können, wurde eine Maissorte mit zwei Häckssellängen 5,5 mm (Spaltweite 1 mm) und 21,0 mm (Spaltweite 2 mm) in je einem Flachsilo einsiliert und jeweils in praxisüblicher Weise mit einem Radlader (15 t) verdichtet.

Um die Vergleichbarkeit des Ausgangsmaterials zu gewährleisten, wurden nach der Ernte die Inhaltsstoffe nach den Methoden des Verbands Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten [21] bestimmt.

Die Charakterisierung des Ausgangsmaterials (Inhaltsstoffe, Häckssellängenverteilung und Verdichtbarkeit) ist grundlegend, um weitergehende Untersuchungen bezüglich Dichte und Gärqualität interpretieren zu können.

Die Längenfraktionierung des Häckselgutes wurde nach einer standardisierten Methode mit einem Siebturm (Rundlochsieb) gemäß DIN 24041 durchgeführt [22]. Um verschiedene Methoden zu vergleichen, wurde sowohl frisches, als auch getrocknetes Material gesiebt (Siebdauer 5 min. mit einer Intervallschaltung im Verhältnis Laufzeit zu Ruhezeit von 30 s zu 1 s). Die Einwaage betrug je 100 g, nach der Siebung ermöglichte die Rückwaage der Einzelfraktionen die Berechnung der prozentualen Anteile folgender Größenklassen:

$x < 2$ mm, $2 \leq x < 3$ mm,
$3 \leq x < 6$ mm, $6 \leq x < 10$ mm,
$10 \leq x < 15$ mm, $15 \leq x < 25$ mm,
$25 \leq x < 40$ mm und $x \geq 40$ mm.

Die Verdichtbarkeit wurde mit einer Materialprüfmaschine (**Bild 2**) untersucht.



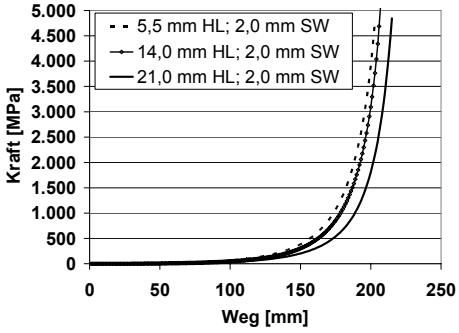


Bild 2: Materialprüfmaschine und Beispiel einer Auswertung als Kraft-Weg Diagramm bei Maisschnittgut mit verschiedenen theoretischen Häckssellängen (HL); (SW = Spaltweite)

Das Häckselgut wurde lose in einen Kunststoffzylinder mit einer Höhe von 30 cm sowie einem Durchmesser von 12,5 cm eingefüllt und über einen Stempel mit einer Geschwindigkeit von 90 mm/min verdichtet. Die Höhe des Zylinders entspricht der Schichtdicke von 30 cm auf dem Flachsilo, die nach der offiziellen Beratung in der Praxis empfohlen wird [23]. Über Zylindervolumen und eingewogene Masse wird die Schüttdichte ermittelt.

Bei der Verdichtung mit der Materialprüfmaschine kann ein maximaler Druck von 0,45 MPa erreicht werden. Typische Belastungen im Silo liegen nach Empfehlung der öffentlichen Beratung bei 0,2 MPa [23]. Die Kraft zur Verdichtung des Materials wird über einen Kraftaufnehmer kontinuierlich gemessen, über dem Weg aufgezeichnet und führt somit zu Kraft-Weg-Diagrammen (Bild 2). Zur Auswertung der Untersuchung wurden Druck-Dichte-Diagramme erstellt. Zusätzlich zur maximalen Verdichtbarkeit wurde auch die Rückfederung des Materials in die Betrachtung mit einbezogen. Dazu wurde nach der Verdichtung auf 0,4 MPa und vorgegebener Wartezeit von 1 min. die Füllhöhe im Zylinder gemessen. Pro Variante wurden 6 Wiederholungen durchgeführt.

Untersuchungen zur Beschreibung des Gärverlaufs in Siliergläsern wurden von der Lehr- und Versuchsanstalt Nordrhein-Westfalen „Haus Riswick“ durchgeführt. Der Gärverlauf bezieht sich auf Gär- und Gewichtsverluste innerhalb eines Zeitraums von 90 Tagen [24]. Zusätzlich wird das Material auf pH-Wert sowie die Gehalte an Gärsäuren, NH_3 und Alkohol untersucht.

Nach Abschluss der Silierung (nach 90 Tagen) erfolgen eine Analyse der Inhaltsstoffe sowie die Bestimmung von Gärqualität und aerober Stabilität, um die Qualität des Silierprozesses zu beurteilen.

Zur Erfassung der tatsächlich erreichten Dichte in den Flach- und Schlauchsilos wurden Dichtemessungen in der Mitte der Silo-Anschnittsfläche durch Einsatz eines Siloblockschneiders (3-fache Wiederholung) durchgeführt.

Zum Zeitpunkt des Einsilierens wurden Datenlogger zur Aufzeichnung des Temperaturverlaufs im Kern der Flach- und Schlauchsilos am Anfang, in der Mitte und am Ende des Silos eingebracht und mit dem Vorschub wieder entnommen. Diese Untersuchungen lassen Rückschlüsse auf den Lufteintritt in die Silos in Abhängigkeit von der Häckssellänge zu. Zusätzlich erfolgten dreimal wöchentlich Temperaturmessungen an verschiedenen Punkten der Anschnittfläche.

Die Silage aus den Flachsilos wurde im Zeitraum vom 13. Februar bis zum 20. März 2004 mit einem wöchentlichen Vorschub von 4 m verfüttert (Entnahmetechnik: Silofräse). Der Untersuchungszeitraum ist durch niedrige Außentemperaturen und Nachtfröste gekennzeichnet.

Erste Ergebnisse der Untersuchungen im Jahr 2003/04

Die Ernte wurde im Herbst 2003 durchgeführt. Aufgrund des vergleichsweise heißen und trockenen Sommers besitzen die Häckselgutproben einen extrem hohen Trockensubstanzgehalt (bis zu 48 %). Dass dieser Wert unter den gegebenen Witterungsbedingungen typisch ist, belegen Ergebnisse aus Sachsen, wonach ein Drittel der Maissilagen aus 2003 einen Trockensubstanzgehalt von über 40 % hatte [25].

Die umfangreichen Untersuchungen wurden im Rahmen einer Dissertation durchgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse ausschließlich für die Sorte „Oldham“ mit den Häcksellängen (HL) 5,5; 14,0 und 21,0 mm jeweils für die Einstellung des Aufbereiters mit der Spaltweite (SW) 1,0 bzw. 2,0 mm dargestellt. Die beiden Extreme, 5,5 mm HL mit 1,0 mm SW und 21,0 mm HL mit 2,0 mm SW, konnten bereits im Flachsilo hinsichtlich der Lagerungsdichte verglichen werden. Ergebnisse zu Untersuchungen an den Schlauchsilos folgen in einer weiteren Veröffentlichung.

In der Ernteperiode hat der Trockenstress zu deutlichen Schwankungen in den Trockensubstanzgehalten von bis zu 11 % geführt (**Tabelle 1**). Insbesondere Proben, die mit der SW 2,0 gehäckselt wurden, zeigen hohe Werte auf. Der Variationskoeffizient für den TS-Gehalt liegt zwischen 1,3 und 3,6 %. Eine Untersuchung des Einflusses der Häcksellänge und Spaltweite auf verschiedene Parameter der Verdichtung ist daher nicht vom Einfluss des Trockensubstanzgehaltes zu trennen.

Das Ergebnis der *Siebanalyse* lässt auf einen deutlichen Einfluss der theoretischen Häcksellänge auf die Längenfraktionierung schließen. Ergebnisse der Zuordnung der Massenanteile zu den einzelnen Fraktionen sind in Form eines Histogramms in **Bild 3** dargestellt.

Der typische Verlauf zeigt, dass bei einer theoretischen Häcksellänge von 5,5 mm über 40 % des Probenmaterials in der Klasse 3≤x<6 mm zu finden sind. Mit steigender theoretischer Häcksellänge nehmen die Massenanteile der höheren Partikelgrößen zu. Ein Einfluss des Aufbereiters ist insbesondere bei den 21 mm-Varianten sichtbar. Eine Spaltweite von 1 mm hat nicht nur eine zerkleinernde Wirkung auf die Körner, sondern auch auf die restlichen Pflanzenteile. Die Maiskörner fallen gewichtsmäßig größtenteils in die Fraktion bis 3-6 mm. Sie besitzen eine größere Masse im Vergleich zu den Restpflanzenpartikeln und beeinflussen somit das Ergebnis der Siebung.

Tabelle 1: Durchschnittliche Trockensubstanzgehalte der Maishäckselproben

Untersuchungsmaterial für:	Variante		TS-Gehalt [%]
	Häcksellänge [mm]	Spaltweite [mm]	
Materialprüfmaschine	5,5	1,0	37
	14,0		36
	21,0		41
	5,5	2,0	46
	14,0		47
	21,0		48
Flachsilo	5,5	1,0	39
	21,0	2,0	43

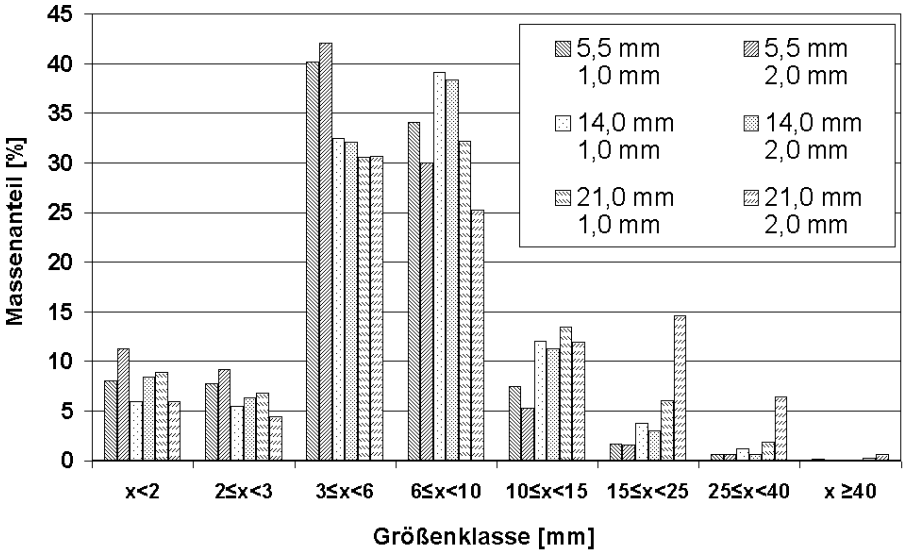


Bild 3: Einfluss der theoretischen Häcksellänge (HL) und Aufbereiter-Spaltweite (SW) auf die Längenfraktionierung (Histogramm)

Bei Betrachtung der Summenhäufigkeit (**Bild 4**) ist für die Fraktionen < 3 mm festzustellen, dass die Unterschiede innerhalb der Varianten bei 10 % Massenanteil liegen. Den höchsten Anteil in dieser Fraktion hat die Variante 5,5 mm HL und 2,0 mm SW. In der Fraktion < 10 mm zeigen die Varianten Abweichungen von 26 %. Insgesamt führt die Einstellung der Spaltweite auf 1,0 mm zu geringeren Unterschieden in der Massenverteilung als die Einstellung auf 2,0 mm.

Die *Schüttdichte von Maishäckselgut* unterschiedlicher Häcksellänge bzw. Spaltweite liegt zwischen 74 und 102 kg_{TM}/m^3; bei einem Variationskoeffizient zwischen 2 und 9 % (**Tabelle 2**). Hier sind große Unterschiede sowohl zwischen den Aufbereitungsgraden als auch zwischen den Häcksellängen festzustellen: Während bei 1 mm SW die Schüttdichte von 5,5 mm HL im Vergleich zur 21,0 mm HL um 16 % höhere Anteile aufweist, reduziert sich die Schüttdichte bei 2,0 mm SW in diesem Fall um 28 %. Zwischen der HL 5,5 und 14,0 mm ist in der Schüttdichte für beide Aufbereitungsgrade ein sehr geringer Unterschied festzustellen. Eine Erhöhung der SW von 1,0 auf 2,0 mm bei gleicher HL bewirkt bezogen auf die Trockensubstanz eine Zunahme der Dichte um 34 % (5,5 mm HL) bzw. eine Reduzierung um 16 % (21,0 mm HL). Bezogen auf die Frischmasse sind die Unterschiede weitaus geringer mit 5 % (5,5 mm HL) bzw. > 29 % (21,0 mm HL).

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur *Verdichtbarkeit* entsprechen tendenziell den Ergebnissen der Schüttdichte (**Bild 5**). Unter Berücksichtigung des *Trockensubstanzgehaltes (TS)* bewirkt die Zerkleinerung von Häckselgut auf 5,5 bzw. 14 mm HL (SW 1,0 mm) bei einem TS-Gehalt von 37 % und einem Druck von 0,2 MPa eine vergleichsweise geringe

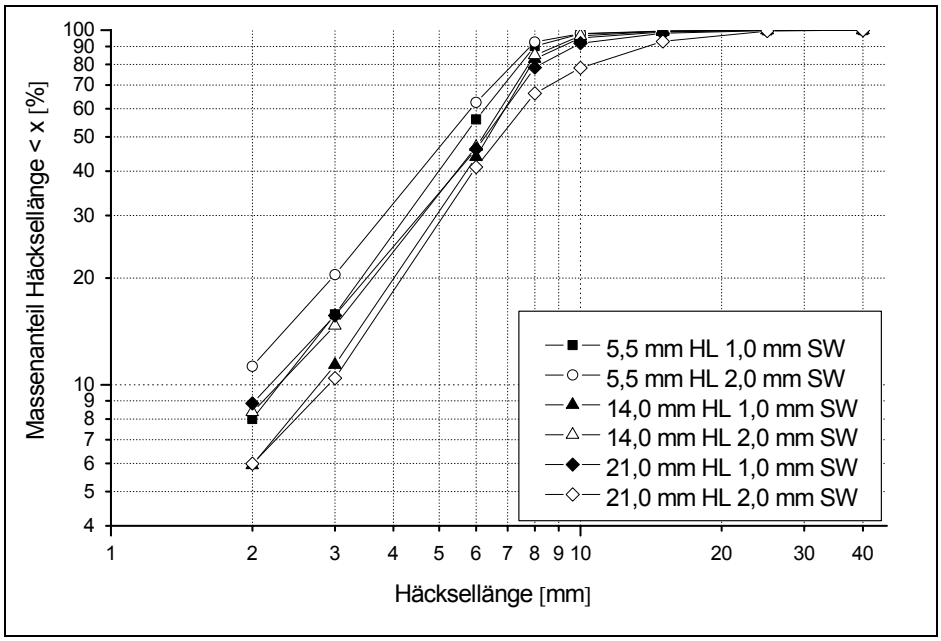


Bild 4: Einfluss der theoretischen Häcksellänge (HL) und Aufbereiter-Spaltweite (SW) auf die Längenfraktionierung (kumulative Häufigkeit)

Tabelle 2: Einfluss von theoretischer Häcksellänge und Aufbereitung von Maishäckselgut auf die Schüttdichte

Spaltweite [mm]		**1,0**			**2,0**		
Häcksellänge [mm]		**5,5**	**14,0**	**21,0**	**5,5**	**14,0**	**21,0**
Schüttdichte	**[kg_{FM}/m^3]**	207	219	217	223	213	154
	[kg_{TM}/m^3]	76	80	88	102	99	74

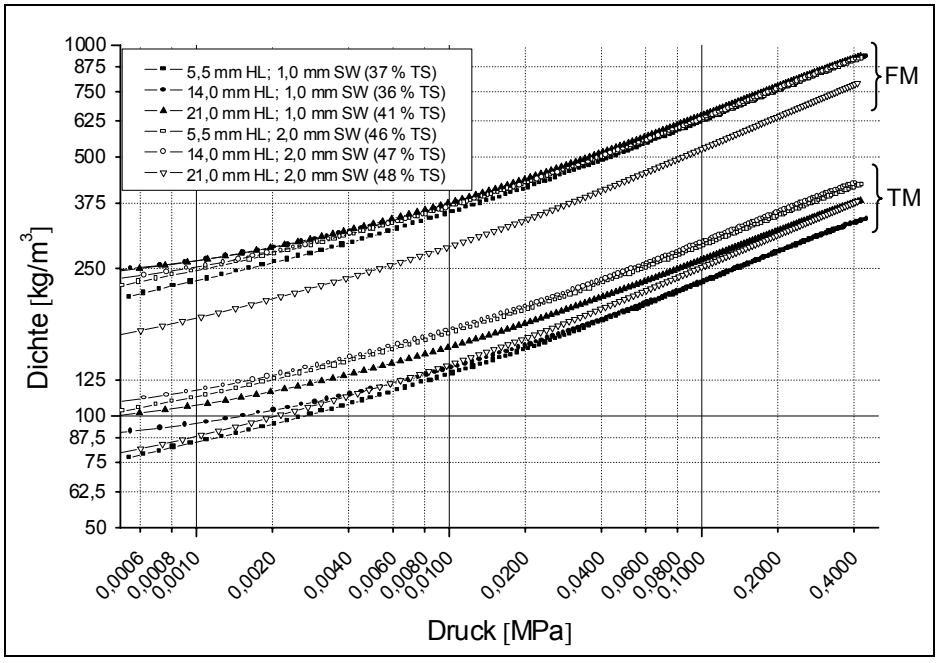


Bild 5: Einfluss von theoretischer Häcksellänge und Aufbereitung auf die Verdichtbarkeit von Maishäckselgut. Frischmasse- im Vergleich zur Trockenmasse-Dichte.

Verdichtbarkeit (275 kg_{TM}/m^3). Im Falle der 5,5 bzw. 14 mm HL (SW 2,0 mm) bewirkt ein Druck von 0,2 MPa eine um 30 % höhere Lagerungsdichte (350 kg kg_{TM}/m^3), während bei der 21 mm-Variante (SW 1,0 bzw. 2,0 mm und 40 bzw. 48 % TS-Gehalt) eine um 13 % höhere Dichte von 310 kg_{TM}/m^3 erreicht werden kann.

Die maximale Verdichtung durch einen *Druck von bis zu 0,45 MPa* komprimiert das auf 5,5 bzw. 14 mm HL zerkleinerte Material (SW 1,0) auf 330 kg_{TM}/m^3. Im Vergleich dazu zeigt die 21,0 mm Häcksellänge (SW 1,0 bzw. SW 2,0 mm) eine um 14 % (375 kg_{TM}/m^3) und die 5,5 bzw. 14 mm HL (SW 2,0 mm) eine um 26 % (415 kg_{TM}/m^3) höhere Dichte auf.

Während der Unterschied in der Trockenmasse-Dichte zwischen 5,5 und 14,0 mm HL für den jeweiligen Aufbereitungsgrad abnimmt, nehmen die Unterschiede zwischen den Aufbereitungsgraden (SW) für diese HL zu. Anders im Falle der 21,0 mm-Variante. Hier unterscheiden sich die Aufbereitungsgrade von anfänglich 16 % im oberen Verdichtungsbereich nicht mehr.

Aufgrund der großen Schwankungen im Trockensubstanzgehalt sind die Unterschiede in der Verdichtbarkeit nicht ausschließlich auf die Häcksellänge bzw. den Aufbereitungsgrad zurückzuführen. Ein Vergleich der Verdichtbarkeit bezogen auf die *Frischmasse* zeigt, dass bei zunehmendem Druck die Variante mit einer theoretischen Häcksellänge von 21,0 mm und einer Spaltweite von 2,0 mm eine geringere Dichte aufweist, als die übrigen Varianten (Bild 5), wobei die Unterschiede mit zunehmendem Druck geringer werden. Ein Druck von 0,2 MPa führt bei der lang gehäckselten Variante zu 645 kg_{FM}/m^3; bei Druckerhöhung auf 0,4 MPa nimmt die Dichte um 20 % zu. Bei den übrigen Varianten beträgt die Dichte bei einem Druck von 0,2 MPa durchschnittlich 763 kg_{FM}/m^3 und steigt bei Erhöhung des Drucks auf 0,4 MPa ebenso um 20 % der Frischmasse.

Um die Elastizität des Materials zu untersuchen, wurde eine Minute nach Verdichtung in der Materialprüfmaschine nochmals der Füllstand im Verdichtungszylinder gemessen und die daraus abzuleitende Dichte nach Rückfederung errechnet. Die Verdichtung mit 0,4 MPa bewirkt zwar eine Dichte von max. 954 kg_{FM}/m^3, diese wird jedoch aufgrund der Rückfederung (Elastizität) auf bis zu 50 % (21,0 mm HL; 2,0 mm SW) reduziert (**Bild 6**). Die Rückfederung steigt mit zunehmender Häcksellänge bei beiden Aufbereitungsgraden. Dieser Effekt führt dazu, dass am Ende des Verdichtungsprozesses nach Rückfederung die Variante mit der intensivsten mechanischen Zerkleinerung (5,5 mm HL mit 1,0 mm SW) eine Dichte von 227 kg_{TM}/m^3 und die Variante mit der geringsten Zerkleinerung (21 mm HL mit 2,0 mm SW) eine Dichte von 196 kg_{TM}/m^3 aufweist.

Die Bestimmung der Lagerungsdichte im Flachsilo durch Messen und Wiegen von Silageblöcken (Siloblockschneider) führt zu ähnlichen Ergebnissen wie bei den Verdichtungsversuchen mit der Materialprüfmaschine: 215 kg_{TM}/m^3 bei stark zer-

kleinertem Material (5,5 mm HL mit 1,0 mm SW) und 192 kg_{TM}/m^3 bei geringem Zerkleinerungsgrad (21 mm HL mit 2,0 mm SW).

Die Untersuchung der Silagequalität (VDLUFA) ergab für das Flachsilo mit Material der Häcksellänge 21 mm die Note ‚2,0' bzw. für die Häcksellänge 5,5 mm die Note ‚1,0'. Die geringen Unterschiede in der Silagequalität sind auf den Essigsäuregehalt zurückzuführen, der im Falle der langen Häckselgut-Variante zu geringeren Gärverlusten geführt hat.

Untersuchungen zur Temperaturentwicklung nach dem Öffnen der Flachsilos ergaben ebenfalls geringe Unterschiede. Während im Falle der 5,5 mm-Variante eine geringe Abnahme der Temperatur zu verzeichnen war, gab es bei der 21 mm-Variante einen geringfügigen Temperaturanstieg (**Bild 7**).

Temperaturmessungen an der Silo-Anschnittsfläche ergaben Unterschiede von bis zu 5°C im oberen Bereich und bis zu 3°C im Silokern (**Bild 8**). Ein Vergleich der Temperaturen in 0,5 m Tiefe mit 1,0 m Tiefe ergab keine Unterschiede.

Diskussion

Der Aufbereiter Corn Cracker hat einen zerkleinernden Effekt auf das Häckselgut. Nach Schurig [26] wird dadurch die Partikelgröße um 15 bis 30 % reduziert. Gleichzeitig ist mit der Aufbereitung ein höherer Energiebedarf verbunden.

Die Siebanalyse ist bei vier Sieb-Wiederholungen im Überlängenbereich mit großen statistischen Fehlern behaftet. Dennoch ist zu erkennen, dass auf 5,5 mm HL zerkleinertes Material bei einer SW von 2,0 mm zu einem höheren Anteil der Fraktionen kleiner 6 mm als die 1,0 mm SW führt, während der Anteil der Fraktion 6 bis 15 mm bei der 1,0 mm-Variante höher liegt als bei 2,0 mm SW. Dieser höhere Anteil in der Grobfraktion und geringere Anteil in der Feinfraktion führt im Falle der 5,5 mm-Varianten unerwartet zu geringeren Dichten bei SW 1,0 mm im Vergleich zur SW 2,0 mm. Zusätzlich könnten die Unterschiede in der Schüttdichte auf eine Aufrauung bzw. Aufspleißung des Häckselgutes bei der engen SW von 1,0 mm zurückzuführen sein, die eine Dichtlagerung der Partikel verhindert.

Die Untersuchung auf Verdichtbarkeit durch einmalige Verdichtung mit einem Druck von 0,4 MPa zeigt im unteren Druckbereich eine Spannweite zwischen den Varianten von ca. 110 kg_{TM}/m^3. Im

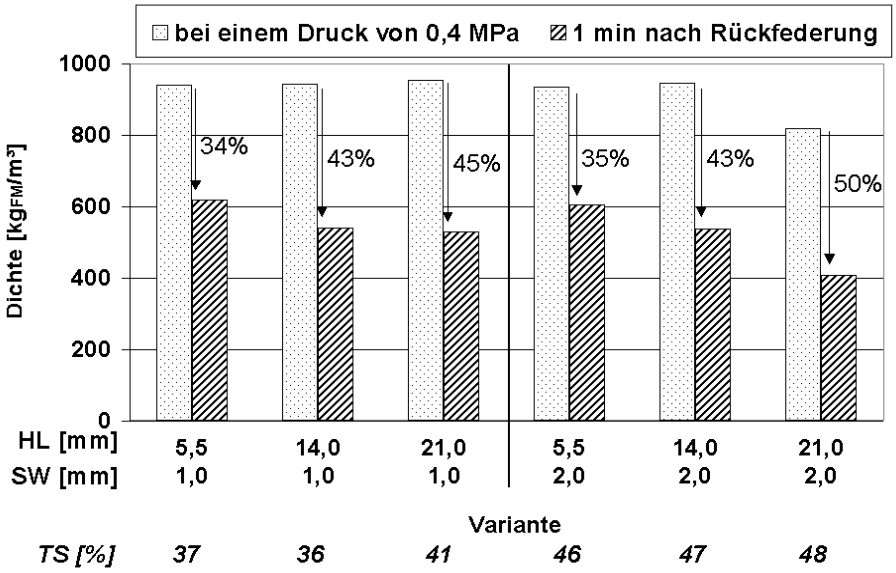


Bild 6: Lagerungsdichte nach Verdichtung mit der Materialprüfmaschine bei einem Druck von 0,4 MPa und nach einer Minute Rückfederung

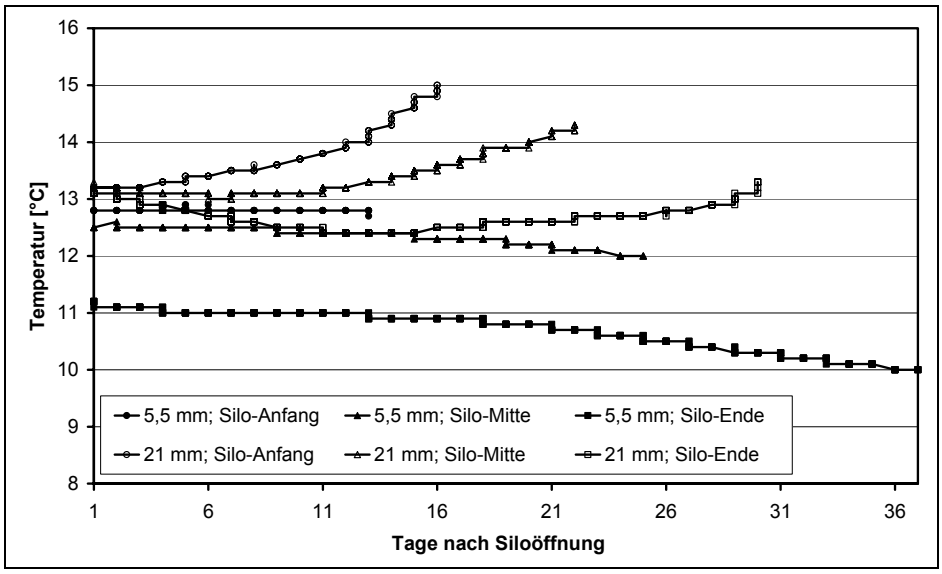


Bild 7: Verlauf der Kerntemperatur nach Öffnung der Flachsilos

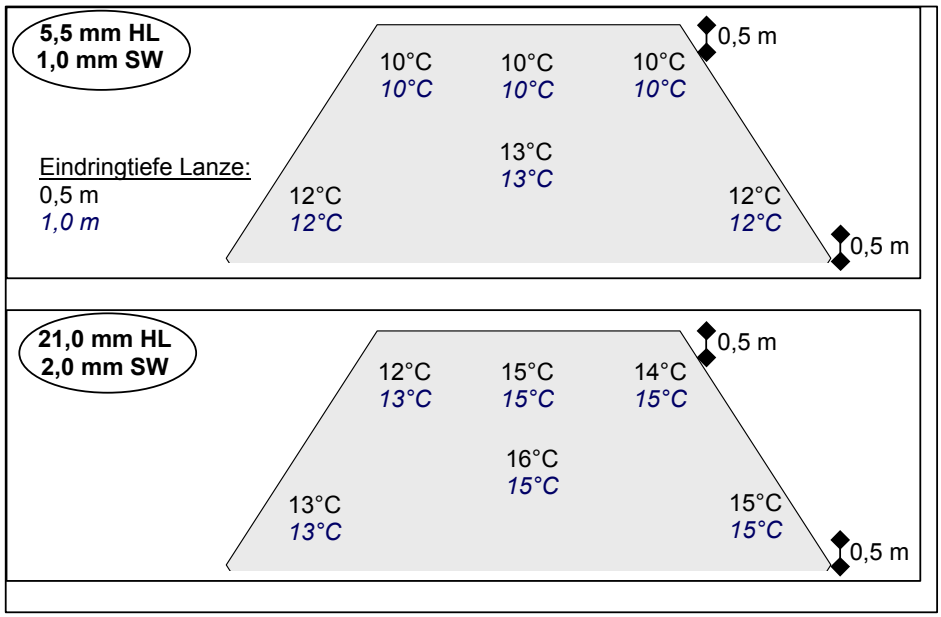


Bild 8: Temperaturen im Anschnittbereich der Flachsilos

oberen Druckbereich reduziert sich diese Differenz auf ca. 60 kg_{TM}/m^3. Erkennbare Tendenz ist, dass sich bei gleichem Pressdruck im unteren Druckbereich trotz einer theoretischen Häcksellänge von 5,5 mm und einer Spaltweite von 1,0 mm eine geringere Dichte erzielen lässt als mit dem Pressgut einer theoretischen Häcksellänge von 14,0 mm bzw. 5,5 mm und 2,0 mm SW. Bei 21,0 mm HL und 2,0 mm SW und damit höherem Überlängenanteil, ist eine geringe Schüttdichte festzustellen.

Die Verdichtbarkeitsuntersuchungen in der Materialprüfmaschine zeigen keinen klaren Einfluss der Häcksellänge auf die Verdichtbarkeit bei maximaler Verdichtung. Ein Einfluss der Spaltweite ist bei den Häcksellängen 5,5 bis 21 mm und SW 2,0 sichtbar.

Die Verdichtbarkeit des Häckselgutes verhält sich analog zu den Schüttdichten, sowohl bezogen auf die Trocken- als auch auf die Frischsubstanz. Eine theoretische Häcksellänge von 21,0 mm und SW von 2,0 mm führt schon bei geringem Druck zu einem steileren Anstieg der Druck-Dichte-Kurve, da sich hier aufgrund der größeren Partikel ein größerer Anteil Luft in den Zwischenräumen befindet, der als erstes bei der Verdichtung herausgepresst wird. Die Dichte nach Rückfederung nimmt mit steigender Häcksellänge ab. Ein hoher Aufbereitungsgrad verstärkt diesen Effekt.

Ein Vergleich der beiden extremen Varianten (5,5 mm HL und 1,0 mm SW mit 21,0 mm HL und 2,0 mm) fasst die untersuchten Parameter in **Tabelle 3** zusammen.

Ein hoher TS-Gehalt führt in Verbindung mit einem geringen Zerkleinerungsgrad bei 0,4 MPa Druck während der Belastung bezogen auf die Trockenmasse zu einer höheren Dichte als stark zerkleinertes Material mit niedrigerem TS-Gehalt. Diese höhere Dichte nimmt jedoch durch die Rückfederung des Materials nach Entlastung stärker ab als die Dichte von stark zerkleinertem Häckselgut. Ob die starke Rückfederung der 21 mm-Variante mehr auf die Häcksellänge oder auf den hohen TS-Gehalt zurückzuführen ist, muss noch ausgewertet werden.

Die Ergebnisse der Verdichtbarkeitsversuche mit der Materialprüfmaschine (0,4 MPa) zeigen einen Unterschied der Dichte von ca. 31 kg_{TM}/m^3 auf. Die Unterschiede im Flachsilo (Verdichtung mit einem Radlader bei 0,2 MPa) liegen bei 23 kg_{TM}/m^3. Richtgrößen für die Dichte von Silomais liegen bei einem Trockensubstanzgehalt von 28 % bei 230 kg_{TM}/m^3 und TS = 33 % bei 270 kg_{TM}/m^3. Bei TS > 33 % wird als Faustzahl angegeben, dass je Prozent TS die Dichte um etwa 10 kg_{TM}/m^3 ansteigen sollte [23]. Dadurch wäre ein Nachsickern von Sauerstoff auch später nach dem Öffnen des Silos weitgehend ausgeschlossen.

Tabelle 3: Vergleich verschiedener Parameter der Verdichtbarkeit bei unterschiedlicher theoretischer Häcksellänge und Spaltweite

Parameter	Einheiten	Häcksellänge [mm] Spaltweite [mm]	
		5,5 1,0	**21,0 2,0**
Siebanalyse			
Massenanteil > 15 mm	[%]	2,4	23
Massenanteil > 25 mm	[%]	0,77	7,03
Materialprüfmaschine			
Trockensubstanzgehalt	[%]	37	48
Schüttdichte	[kg_{FM}/m^3]	207	154
	[kg_{TM}/m^3]	76	74
Dichte bei 0,2 MPa	[kg_{FM}/m^3]	755	645
	[kg_{TM}/m^3]	277	309
Verdichtbarkeit bei 0,4 MPa	[kg_{FM}/m^3]	von 150 auf 890	von 150 auf 790
	[kg_{TM}/m^3]	von 55 auf 326	von 72 auf 379
	[kg_{TM}/m^3 Differenz]	271	307
Rückfederung	[kg_{FM}/m^3]	von 939 auf 618	von 817 auf 408
	[kg_{TM}/m^3]	von 327 auf 227	von 376 auf 196
	[% der TM]	31	47
Flachsilo			
Trockensubstanzgehalt	[%]	39	43
Dichte zum Zeitpunkt „Öffnen“	[kg_{TM}/m^3]	215	192

Bezüglich der Gärqualität haben beide Varianten im Flachsilo gute Ergebnisse erbracht, was die gute Gäreignung von Mais bestätigt. Nach dem Öffnen der Flachsilos ist der Einfluss der Häcksellänge auf die Nacherwärmung ebenfalls als gering zu bewerten, was natürlich im Zusammenhang mit dem wöchentlichen Vorschub von 4 m und niedrigen Außentemperaturen zu sehen ist.

Fazit

Aus Sicht der Tierernährung wird ein höherer Strukturwert bei Silomais diskutiert. Damit verbunden ist eine Erhöhung der Häcksellänge. Innerhalb der Prozesskette der Futterernte- und -konservierung stellt die Verdichtung ohnehin die Schwachstelle dar. Eine größere Häcksellänge könnte dieses Problem verstärken.

Untersuchungen zur Verdichtbarkeit und Silierbarkeit wurden im Labor- und im Praxismaßstab durchgeführt. Dazu erfolgte u. a. die Einsilierung von Maishäckselgut mit der Länge 5,5 und 21,0 mm im Flachsilo. Für Untersuchungen zur Verdichtbarkeit im Labor wurde zusätzlich eine Häcksellänge von 14,0 mm in die Betrachtung mit einbezogen. Die Untersuchungen ergaben trotz eines hohen Trockensubstanzgehalts von durchschnittlich 40 % eine hohe Silagequalität für beide Häcksellängen. Ein hoher Vorschub von 4 m pro Woche führte auch nach dem Öffnen der Silos weder zu einer Qualitätsminderung noch zu einer deutlichen Temperaturänderung im Silokern.

Diese Arbeiten werden fortgesetzt. Mit Ergebnissen zu Schlauchsilagen, die mit einem Vorschub von 1,5 m pro Woche bei höheren Außentemperaturen verfüttert wurden, ist in einer der nächsten Ausgaben zu rechnen.

Verzeichnis der Abkürzungen

FM - Frischmasse
HL - theoretische Häcksellänge in mm
NEL - Nettoenergie Laktation
SW - Schneid-Spaltweite des Corn Crackers (Aufbereiters) in mm
TM - Trockenmasse
TS - Trockensubstanzgehalt in %

Literatur

[1] *Langenhoff, M.:* Futtermittelkundliche Bewertung von zwei Silomaishybriden bei Wiederkäuern. Diss. Tierärztliche Hochschule Hannover; 2002

[2] *Guth, N.:* Unterschiedliche Häckselgutstruktur von Halmfutter-Einfluss auf Futteraufnahme, Leistung und Kauverhalten von Rindern, Silagequalität und Häckselleistungsbedarf sowie bildanalytische Vermessung der Futterstruktur. Diss. Universität Gießen, 1995

[3] *Spiekers, H. und E. Pfeffer:* Umweltschonende Ernährung von Schwein und Rind mit Stickstoff und Phosphor. Übersichten zur Tierernährung. V. 19 (1991) (3) S. 201-246.

[4] *Spiekers, H., R. Miltner, W. Beeker*: Nacherwärmung gefährdet besten Silomais. Landwirtschaftliches Wochenblatt Westfalen Lippe (2003) 33, S. 18-19.

[5] *De Brabander, D. L., De Boever, J. L., Vanacker, J.M., Boucque, CH.V., Bottermann, S.M.:* Evaluation of physical structure in dairy cattle nutrition. In: Recent Advances in Animal Nutrition, (1999) p. 111-140.

[6] *Erhardt, N. und R. Miltner:* Maisabreifeuntersuchung. Mitteilungen der Landwirtschaftskammer Weser-Ems, (2002), http://www.landwirtschaftskammer.com/rlp/landbau/prod_tec/mais/mais2-36.htm

[7] *Anonymus:* Futterwert und Siliereignung von Maissilage in Abhängigkeit vom Sortentyp. Untersuchung der Landwirtschaftskammer Rheinland (2002), http://www.riswick.de/pdf/siliereig_mais.pdf

[8] *Höner, K., Lebzien P., Flachowsky, G., Schwarz, F.-J.:* Einfluss von Silagen aus unterschiedlichen Maishybriden auf die Umsetzungen im Verdauungstrakt von Kühen. In: Proceedings of the Society of Nutrition Physiology. DLG-Verlag, Bd. 11 (2002), 56. Tagung in Göttingen. S. 44.

[9] *Böhm. M., Schwarz, F.J:, Kirchgessner, M.:* Zum Futterwert von Maissilage mit unterschiedlicher Reife bei der Silierung. Bayr. Landw. Jb. (1983) 60, S. 893-902.

[10] *Weissbach F. und Auerbach, H.:* Wann ist der Mais siloreif? Die Forderung nach hoher Grundfutterqualität und die neue Reifeeinstufung von Silomais. 12. Maiskolloquium in Wittenberg, 24.-25.3.1999, S. 25-3

[11] *Hartmann, A., Presterl, T., Geiger, H.:* Bestimmung des optimalen Erntezeitpunktes von Silomaissorten mit langsamer versus schneller Restpflanzenabreife. Landbauforschung Völkenrode Sonderheft (2000) 217, S. 83-93.

[12] *Hepting, L.:* Erträge sichern - Qualität sichern. Mais (1993) 21, S. 26-29.

[13] *Schwarz, F.J., Preissinger, W., Kirchgessner, M.:* Verdaulichkeit und Energiegehalt von unterschiedlich zerkleinerter Maissilage bei Rindern und Schafen. Agribiological Research, 50 (1997) 3, S. 225-236.

[14] *Schwarz, F. J. und Kirchgessner, M.:* Häcksellänge von Maissilage und ihr Einfluss auf Futteraufnahme und Milchleistung. Das wirtschaftseigene Futter, (1982) Heft 2, S. 97-106.

[15] *Leurs, K., Wagner, A. und Büscher, W.:* Nacherwärmung von Maissilage-Einfluss der Häcksellänge. Landtechnik 59 (2004) 2, S. 100-101.

[16] *Schurig, M., Rödel, G., Wild, K.:* Schnittlängenqualität. Landtechnik 51 (1996) 3, S. 146-147.

[17] *Guth, N. und F.J. Bokisch,:* Bewertung der Häckselstruktur. Landtechnik 47 (1992) 5, S. 223-226.

[18] *Honig, H. und Rohr, K.:* Silomais - wie kurz häckseln? Top Agrar (1984) 9, S.76-79.

[19] *Johnson, L.M., Harrison, J.H., Davidson, D., Mahanna, W.C., Shinners, K.:* Corn Silage Management: Effects of Hybrid, Maturity, Inoculation, and Mechanical Processing on Fermentation Characteristics. Journal of Dairy Science, Vol. 86 (2003), p. 287-308.

[20] *Steinwidder, A.:* Einfluss der Futterkonservierung auf die Strukturwirksamkeit von Grundfutter. 8. Alpenländisches Expertenforum in Gumpenstein, 9.-10.4. 2002, S. 7-10.

[21] *VDLUFA:* Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten. Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. III (1993), VDLUFA-Verlag: Darmstadt.

[22] *Kromer, K.H.:* Zerkleinerung von Mais in Trommelschneidwerken. Fortschr. Ber. VDI, Reihe 14 Nr. 60. Düsseldorf VDI-Verlag 1993.

[23] *Thaysen J. et al. :* Futterkonservierung. Hrsg. Nordwestdeutsche Landwirtschaftskammern. 6. Ausgabe, Oldenburg (2002).

[24] *DLG*: DLG-Richtlinien für die Prüfung von Siliermitteln auf DLG-Gütezeichenfähigkeit. Hrsg. DLG Frankfurt a. M. (2000)

[25] *Steinhöfel, O.:* Mit Thermobildern Nacherwärmung auf der Spur. dlz 3/2004, S. 108-112.

[26] *Schurig, M. und G. Rodel:* Power Consumption and the effekt of Corncrackers. ASAE (1993) no. 931586. American Society of Agricultural Engineers.

Autoren

Dr. Andrea Wagner
Institut für Landtechnik der Universität Bonn
Nussallee 5
53115 Bonn
Tel.: +49/(0)228/73 2391
Fax: +49/(0)228/73 2596
Email: Andrea.Wagner@uni-bonn.de

Dipl. Ing. agr. Kristina Leurs
Institut für Landtechnik der Universität Bonn
Nussallee 5
53115 Bonn
Tel.: +49/(0)228/73 3048
Fax: +49/(0)228/73 2596
Email: Kristina.Leurs@uni-bonn.de

Prof. Dr. Wolfgang Büscher
Institut für Landtechnik der Universität Bonn
Nussallee 5
53115 Bonn
Tel.: +49/(0)228/73 2396
Fax: +49/(0)228/73 2596
Email: buescher@uni-bonn.de